

# 基于常规测井资料综合评价延川南致密砂岩气层

王安龙

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏 南京 210011)

**摘要:**研究提出利用常规测井资料有效评价致密砂岩气储层的解释思路及解释方法。在解释思路上,采用传统定量解释与特殊评价相结合的综合评价思路;在评价方法上,采用在地质背景分析基础上,分构造、分沉积建立岩电评价参数;分物性建立可变岩电参数;在分析储层岩性、物性背景及敏感曲线特征基础上采用三孔隙度含气指示法有效判别气层属性。通过与实验数据及大量测试结果对比,气层识别准确率明显提高。

**关键词:**致密气储层;测井解释;可变岩电参数;含气指示法

中图分类号:P631.84

文献标识码:A

## Comprehensive evaluation of dense sandstone gas layer in southern Yanchuan area based on conventional logging data

Wang Anlong

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, East China Oil and Gas Company, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210011, China)

**Abstract:** In this paper, we proposed the interpretation thought and method for the tight sandstone gas reservoirs. Firstly, we took the comprehensive evaluation method, combining the traditional quantitative interpretation with the special evaluation and the analysis of geological background to establish the parameters of rock electricity evaluation by dividing structure and deposition. Then, we used the variation of porosity to establish the variation of rock electrical parameters. Based on the analysis of reservoir lithology, physical property background and sensitive curve characteristics, we used the gas bearing attributes of three kinds of porosity curves to identify the gas reservoir attributes. By comparing with the test data and a large number of test results, the accuracy of gas reservoir identification was improved obviously.

**Key words:** tight gas reservoir, log interpretation, variation of rock electrical parameters, indication method of gas bearing

在测井评价领域常常遇到这样的问题,很多经典的识别油、气、水、干层的方法不再那么适用,例如在定性识别油气层上,同一口井、同一岩性条件下,有些高阻层未必是油层,而低阻层未必是水层;在识别气层方法上的“声波跳跃”现象在有些致密气层上没有出现;在定量解释储层饱和度时,利用岩电实验获得岩电参数 $N=3.17$ 这样超出一般认识的结果。这些现象的出现不是以往测井方法不正确,而是我们研究的对象主体悄然发生变化。反观近些年来我国

主要油气田勘探及开发对象可以发现,研究对象正从传统的中、细砂岩储层转变为致密砂岩、灰岩、火成岩等非传统储层;物性由中、高孔渗到低孔、特低渗;油藏类型由构造油气藏到岩性油气藏。正是这些特殊油层评价的增多,造成我们以往定性判别这些储层的曲线特征,定量计算储层的阿尔奇公式一再出现“意外”<sup>[1-4]</sup>。

以鄂尔多斯盆地延川南区块石盒子组致密砂岩气储层分析为例,总结出符合延川南区块地质特点

收稿日期:2018-04-27。

作者简介:王安龙(1984—),男,工程师,测井解释及储量研究。

的致密砂岩储层的测井评价方法。

## 1 解释模型研究

### 1.1 细分构造及沉积建立模型

以鄂尔多斯盆地延川南区块石盒子组、山西组致密砂岩气为例,延川南区块分为A和B构造带,两个构造带致密气储层埋深及水型差异较大,A构造带气储层埋深主要在500~1000 m,水型以NaHCO<sub>3</sub>为主,B构造带气储层埋深主要在1000~1500 m,水型以CaCl<sub>2</sub>为主;山西组和石盒子组沉积条件也同,山西组为三角洲沉积,石盒子组为河流相沉积。因此,如果不分具体地质条件的差异就统一建立岩电解释参数显然不合理,就可能出现前文所述的 $N=3.17$ 这样的异常值。所以分构造、分层组进行参数研究是符合地质规律的处理方式。由于所取得的分构造、分层组实验资料点有限,因此采用Pickett图法求取不同分组条件下的 $m$ 、 $n$ 、 $a$ 、 $b$ 值(表1)。

Pickett图法以阿尔奇公式为基础。在阿尔奇公式中, $m$ 和 $a$ 是互相制约的, $a$ 大, $m$ 就小; $a$ 小, $m$ 就大。实际上,岩石粒径、孔喉的大小都影响阿尔奇公式中的岩电参数的大小,由阿尔奇公式,我们可以研究地层电阻率与孔隙度之间的关系,这就是Pickett交会图方法的基础,见式(1),即:

$$R_t = a \times \phi^{-m} \times R_w \times I \quad (1)$$

$$R_t = a \times \phi^{-m} \times R_w \times S_w^{-n}$$

式中: $R_t$ 为地层电阻率,ohm.m; $\phi$ 为地层孔隙度,%; $R_w$ 为地层水电阻率,ohm.m; $I$ 为电阻增大率; $S_w$ 为含水饱和度,%; $m$ 为孔隙度指数; $n$ 为饱和度指数。

将上式两边取对数得式(2):

$$\log(R_t) = -m \times \log(\phi) + \log(a \times R_w) + \log(I) \quad (2)$$

由此可见:当 $a$ 、 $R_w$ 和 $I$ 为常数时, $R_t$ 与 $\phi$ 在双对

数坐标系中呈线性关系,斜率为 $m$ ,如果储层是水层,电阻增大率为1,在Pickett图上可以直接读出地层水的电阻率。这即是Pickett图法求取胶结指数 $m$ 、地层水电阻率方法的基础,Pickett图方法见图1<sup>[5-8]</sup>。

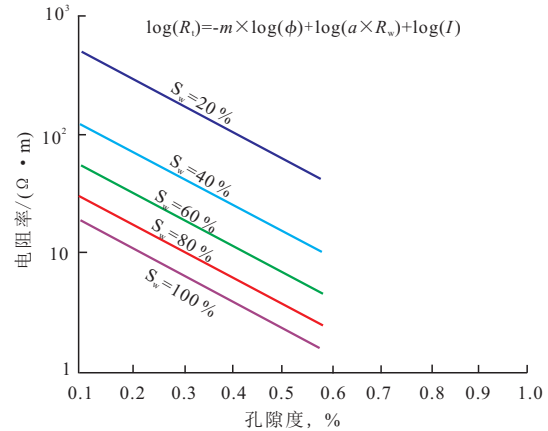


图1 Pickett图法求取岩电参数及地层水电阻率曲线

Fig. 1 Litho-electric parameters and formation water resistivity gained by Pickett method

### 1.2 细分物性建立模型

根据传统理论对 $m$ 及 $n$ 的认识, $m$ 为孔隙度指数(胶结指数),它与地层岩性、孔隙度大小和孔隙结构复杂程度有关, $n$ 为饱和度指数,是对饱和度微观分布不均匀的校正。 $m$ 及 $n$ 跟储层孔隙性均具有一定关系。通过对现有石盒子组、山西组26块岩样的综合分析后发现, $m$ 、 $n$ 与孔隙度均具有较好的相关性,其中 $m$ 与孔隙度呈现正相关, $n$ 与孔隙度呈现负相关(表2)。说明在致密储层条件下,物性是影响饱和度指数与胶结指数的关键因素。从表2中可以看出,孔隙度从1.3%到12.1%对应的 $m$ 和 $n$ 值变化大,尤其是饱和度参数 $n$ 值,因此,当不考虑物性而采用统一

表2 石盒子组孔隙度与岩电参数关系数据

Table 2 Data of relation between porosity and litho-electric parameters of Shihezi formation

孔隙度,%	$a$	$b$	$m$	$n$
1.3	1	1.027 7	1.398	4.9
3.9	1	1.047 3	1.745	3.3
4.6	1	1.054 8	1.746	2.9
6.7	1	0.899 6	1.778	3.5
7.8	1	1.169 7	1.684	3.1
9.6	1	1.017 7	1.978	2.5
9.9	1	0.997 3	1.973	2.4
12.1	1	1.035 0	1.778	1.8

表1 Pickett图法求取岩电参数及地层水电阻率数据

Table 1 Data of litho-electric parameters and formation water resistivity gained by Pickett method

构造带	层位	Pickett图法				
		$a$	$b$	$m$	$n$	$R_w/(\Omega \cdot m)$
A构造带	石盒子组	1	1	1.73	2	0.37
	山西组	1	1	1.73	2	0.3
B构造带	石盒子组	1	1	1.73	2	0.47
	山西组	1	1	1.73	2	0.37

拟合出的平均岩电参数时,就会出现解释饱和度的偏大和偏小,尤其在一些饱和度偏低的储层可能做出判断上的失误。

含气饱和度模拟:根据已有测试结论的井数据,给定储层平均电阻率的情况下,分别按照固定岩电参数及可变岩电参数进行模拟,分析在两种岩电参数不同的情况下所计算出的含气饱和度。从图2中可以明显看出,在具有相对高孔隙度(POR>10%)的气层中两种岩电参数计算的含气饱和度差异很小;而在相对低孔隙度(5%<POR<10%)差气层中两种岩电参数计算的含气饱和度差异较大;在超低孔(POR<5%)干层中两种岩电参数计算的含气饱和度差异更大。由此可见,如果在差气层(5%<POR<10%)孔隙储层条件下,采用统一岩电参数计算饱和度和将有可能将差气层误判为气层。

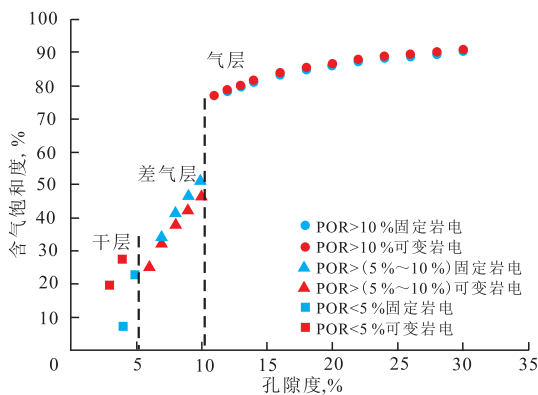


图2 不同物性条件下两种岩电参数计算含气饱和度差异  
Fig. 2 Differences of gas saturation calculated by two types of litho-electric parameters under different physical properties

综上实验分析及模拟结果,为进一步精细评价Y区块致密储层含气性,研究利用孔隙度确定岩电参数(图3、图4及式3),采用的岩电参数考虑了物性对

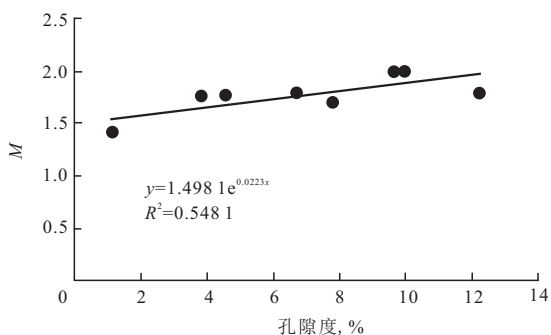


图3 地层因数(M)与孔隙度关系  
Fig. 3 Relation between formation coefficient(M) and porosity

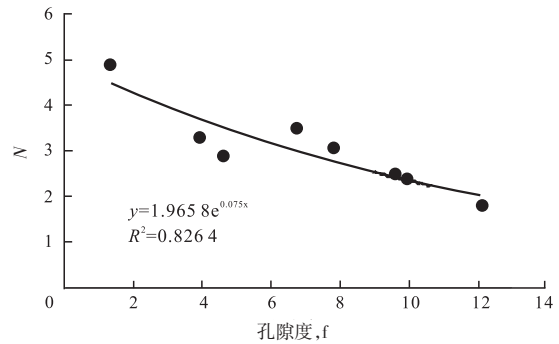


图4 饱和度指数(N)与孔隙度关系  
Fig. 4 Relation between saturation exponent(N) and porosity

参数的重要影响,更加符合区块储层特点。

$$a=1, m=1.4981e^{0.0223 \times \text{POR}}, b=1, n=4.97e^{-0.075 \times \text{POR}} \quad (3)$$

### 1.3 三孔隙度含气指示法

充分利用丰富的测井信息建立特殊评价参数,也是评价气储层的有效途径。含气指示的方法模型很多,但如何选用适合本地区储层的方法,是要在了解储层含气控制因素及影响因素的基础上,选用适合的敏感曲线及其演变而来的评价参数。

以延川南区块石盒子组、山西组致密砂岩气为例,通过分析实验,该区致密砂岩储层石盒子组孔隙度分布范围为6%~14%,渗透率为(0.04~9.2)×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>;山西组孔隙度分布范围为6.4%~12.9%,渗透率为(0.06~11.2)×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,属于典型的低、特低孔、低渗、特低渗储层。正是由于物性差,使得岩性背景远高于含气性对测井信息的影响,因此就会出现含气性的变化在测井曲线上很难区分,经典的“声波跳跃”现象消失,“中子密度”挖掘效应在判别气层差异上不明显。在定量计算孔隙度参数时,由于区块岩性复杂(图5、图6),岩屑类砂岩比重大,岩屑砂岩所含矿物成分的复杂多变使储层的骨架值多变<sup>[9]</sup>,因此,在传统石英砂岩储层评价中,通过确定储层的岩性骨架值计算孔隙度的精度就会受到很大影响,进而含气饱和度同样不准确。综上分析,储层物性差及岩性复杂是造成常规方法评价不准确的根本原因。因此在评价思路选择避开受岩性影响的孔隙度绝对值求取,退而求取受含气性影响的孔隙度的相对变化是识别含气性的一种途径。

在通过对多条曲线的含气性敏感分析基础上,采用含气性反应最敏感的三孔隙度曲线,通过泥质校正消除同一背景下的岩性影响,见式(4);再对含

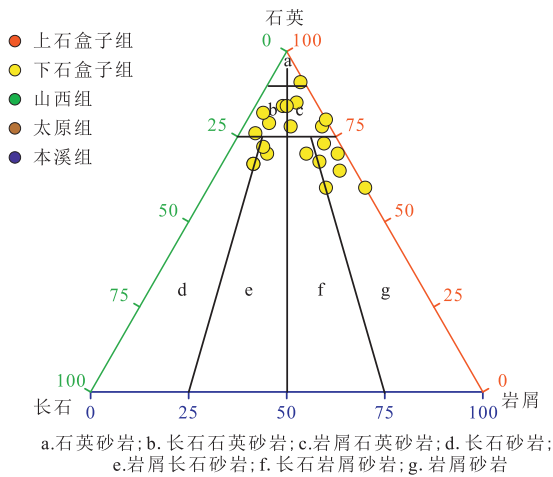


图5 下盒子组岩性分布

Fig. 5 Lithology distribution of Xiahezi formation

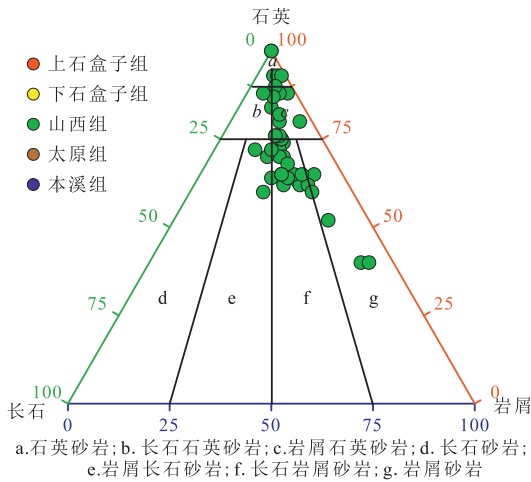


图6 山西组岩性分布

Fig. 6 Lithology distribution of Shanxi formation

气对三孔隙度的差异化进行放大,见式(5)、式(6),能够较为清楚地反映储层含气性差异<sup>[6-10]</sup>。

$$\phi_p = \frac{DEN - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}} - V_{sh} \frac{\rho_{sh} - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}}$$

$$\phi_n = \frac{CNL - \phi_{ma}}{\phi_f - \phi_{ma}} - V_{sh} \frac{\phi_{sh} - \phi_{ma}}{\phi_f - \phi_{ma}}$$

$$\phi_T = \frac{DT - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} - V_{sh} \frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (4)$$

式中:  $\phi_p$ 、 $\phi_n$ 、 $\phi_T$  分别为密度孔隙度值、中值孔隙度值、声波时差孔隙度值,%;  $V_{sh}$  为泥质含量,%;  $DEN$ 、 $CNL$ 、 $DT$  分别为补偿密度测井值、补偿中子测井值、声波时差测井值,  $g/cm^3$ 、%、 $\mu s/m$ ;  $\rho_{ma}$ 、 $\phi_{ma}$ 、 $\Delta t_{ma}$  分别为补偿密度骨架值、补偿中子骨架值、声波时差骨架值,  $g/cm^3$ 、%、 $\mu s/m$ ;  $\rho_f$ 、 $\phi_f$ 、 $\Delta t_f$  分别为补偿密度流体值、补偿中子流体值、声波时差流体值,  $g/cm^3$ 、%、 $\mu s/m$ ;  $\rho_{sh}$ 、 $\phi_{sh}$ 、 $\Delta t_{sh}$  分别为补偿密度泥岩值、补偿中子泥岩值、声波时差泥岩值,  $g/cm^3$ 、%、 $\mu s/m$ 。

$$Y_1 = a_1 \phi_p - b_1 \phi_n \quad (5)$$

$$Y_2 = a_2 \phi_n - b_2 \phi_T \quad (6)$$

式中:  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  为孔隙度校正系数,隐含为1。当在  $Y_1$  与  $Y_2$  曲线在储层段出现包络面积,包络面积越大反映为气层的几率越高,反之则指示为水层或致密干层。

## 2 解释精度检验

A井1233~1235m(1号层)井段及1245~1253.5m(3号层)为致密砂岩储层段,采用上述方法重新处理该层段,通过与对应层段的核磁共振结果进行对比(表3),1号气层的测井解释平均孔隙度为10.1%,核磁共振对应储层的平均孔隙度为9.6%;测井解释的平均含气饱和度为61.2%,核磁共振分析的平均含气饱和度为59.5%;3号差气层的测井解释平均孔隙

表3 A井核磁共振实验数据

Table 3 Experimental data of MRI of well A

测井解释	原始编号	井深/m	层位	孔隙度, %	可动流体, %	束缚流体, %	测井孔隙度平均值, %	分析孔隙度平均值, %	测井饱和度平均值, %	分析饱和度平均值, %
1号层 (气层)	Y6-4	1233.45 ~ 1233.50	$P_{1s}^2$	9.87	57.24	42.76	10.1	9.6	61.2	59.5
	Y6-5	1234.10 ~ 1234.15	$P_{1s}^2$	10.48	67.11	32.89				
	Y6-6	1234.15 ~ 1234.23	$P_{1s}^2$	9.25	60.94	39.06				
	Y6-7	1234.80 ~ 1234.85	$P_{1s}^2$	8.99	52.71	47.29				
3号层 (差气层)	Y6-12	1245.10 ~ 1245.15	$P_{1s}^2$	9.23	47.29	52.71	7.8	7.0	40.2	39.8
	Y6-13	1245.75 ~ 1245.80	$P_{1s}^2$	5.58	33.46	66.54				
	Y6-14	1246.50 ~ 1246.55	$P_{1s}^2$	8.01	43.10	56.90				
	Y6-15	1247.15 ~ 1247.20	$P_{1s}^2$	4.05	31.42	68.58				
	Y6-16	1248.05 ~ 1248.10	$P_{1s}^2$	8.11	43.65	56.35				

表4 测井解释成果与测试情况对比  
Table 4 Comparison between logging interpretation results and testing results

井名	层号	深度段/ m	厚度/ m	GR/ API	DEN/ (g·cm <sup>-3</sup> )	CNL, %	AC/ (μs·m <sup>-1</sup> )	LLD/ Ω	POR, %	PERM/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	Sg, %	SH, %	解释 结论	测试 结论	产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
X1	16	639.5~651.0	11.5	36.80	2.46	14.40	273.10	138.94	16.00	3.24	66.00	7.00	气层	气层	4 155
X2	29	1 135.3~1 142.5	7.2	46.5	2.41	6.8	222.2	297.8	9	0.5265	63	8.8	气层	气层	6 158
X3	23	1 244.8~1 253.5	8.7	49.07	2.55	11.29	233.91	83.27	10.5	0.5265	50	18.49	气层	气层	1 862
X4	27	1 229.7~1 236.7	7	44			223.8	281.86	8.5	0.25	62	9.6	气层	气层	1 547
X5	23	1 191.6~1 194.0	2.4	67.20			233.70	121.86	10.00	0.34	60.00	15.70	气层	气层	4 051
	25	1 201.2~1 209.1	7.9	65.60			218.60	184.93	9.00	0.28	58.00	14.70	气层	气层	4 051
X6	11	983.4~987.4	4	28.2	2.42	14.3	256.5	110	14.3	2.484	63	10	气层	气层	6 756
	14	1 163.6~1 166.6	3	44.30			253.30	616.13	13.50	1.66	81.00	13.30	气层	气层	8 343
X7	18	1 217.0~1 218.7	1.7	49.60			242.50	236.05	12.80	1.00	70.00	11.40	气层	气层	8 343
	20	1 219.7~1 221.8	2.1	49.80			247.70	191.42	13.00	1.38	70.00	11.90	气层	气层	8 343
	22	1 225.7~1 229.6	3.9	56.40			236.70	348.83	10.00	0.46	68.00	16.40	气层	气层	8 343
X8	22	1 158.7~1 165.0	6.2	41.5			273.5	175.47	17	6.345	78	11.1	气层	气层	10 000
	25	1 195.3~1 197.9	2.6	46.5			245.6	447.67	12.5	0.972	80	14.1	气层	气层	10 000
X9	9	724.3~725.4	1.1	37.8			231.4	109.36	5.3	0.13	20.5	17.7	干层	干层	无产
	18	1 121.7~1 127.9	6.2	76.22	2.66	8.91	202.45	113.04	1.24	0.027	0.7	27.49	干层	干层	无产
X10	20	1 135.0~1 141.4	6.3	68.38	2.64	8.24	205.7	120.73	2.46	0.040 5	2.44	22.68	干层	干层	无产
X11	29	1 329.7~1 331.6	1.9	40.35	2.41	3.09	224.13	91.79	8.3	0.283 5	49	6.98	差气层	差气层	829
	15	812.9~814.0	1.1	50.33	2.47	12.20	244.16	157.62	7.88	0.36	49.45	20.44	差气层	干层	无产
X12	27	1 320.0~1 322.4	2.4	49.6	2.48	4.64	235.71	69.85	12	0.675	55	10.72	差气层	差气层	829
X13	17	1 127.3~1 129.3	2	64.85	2.21	26.86	254.92	104.95	7.6	0.310 5	43	24.36	差气层	差气层	320
X14	22	1 210.4~1 219.0	8.6	81.96	2.47	9.19	230.85	69.92	10.5	0.594	52	19.12	差气层	干层	无产
X15	19	1 127.9~1 135.0	7.2	55.57	2.57	7.24	223.52	69.47	9.3	0.378	33	12.78	气水 同层	干层	无产

度为7.8%，核磁共振对应储层的平均孔隙度为7.0%；测井解释的平均含气饱和度为40.2%，核磁共振分析的平均含气饱和度为39.8%。通过与核磁对比说明解释方法的解释精度较高。

### 3 实际应用效果

B井山西组一段发育致密砂岩储层，从测井曲线分析主力砂层5号层具有岩性纯（GR呈现低值相应），渗透性好（SP异常幅度大，双侧向电阻率呈现正差异），三孔隙度曲线特征表现出中子“挖掘效应”，密度值降低，声波曲线增大的特点。通过含气指示法可以看出5号层出现明显含气指示，含气性特征明显。通过二次定量计算含气饱和度为61%，孔隙度为8.1%，综合解释为气层。后期通过压裂测试5号层，获得最高日产气6 158 m<sup>3</sup>/d。推广使用该方法用于老井复查后，提出的15口测试井，测试成功率达到87%（表4），取得了令人满意的测试效果。

### 4 结论

1) 在定量评价方法上，考虑构造、沉积相的不同，采用分构造、沉积建立测井解释模型；考虑物性变化造成的岩电参数差异，采用可变岩电参数的方式建立岩电参数解释模型。

2) 在定性评价方式上，根据含气响应敏感曲线，采用三孔隙度含气指示法识别气层，规避在岩性多变情况下对定量解释参数的影响。

3) 从实际应用效果分析，采用文中的模型和方法进行二次解释并测试，15口井获得高产气流，解释准确率较一次解释提高23%。

#### 参考文献

- [1] 张峭楠. 致密天然气砂岩储层: 成因和讨论[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 1-10.
- [2] M M Abu-Shanab, G M Hamada. Improved porosity estimation

(下转第82页)